

論文 けい酸塩系表面含浸工の改質効果に基づく費用対効果に関する一考察

松田 匠生*1・近藤 拓也*2・黒岩 大地*3・田所 良太*4

要旨：けい酸塩系表面含浸工の改質効果を定量的に評価できるビッカース硬さ試験を用いて、母材モルタルの水セメント比および表面含浸材使用量を試験要因として改質深さ、および効果を示す面積を測定した。これらとけい酸塩系表面含浸工に要する直接工事費との関連性について評価を行った。その結果、水セメント比が小さい場合、表面含浸材の使用量が増加しても得られる改質効果は低く、使用量の増加に対する費用対効果が低い傾向が得られた。一方で水セメント比が増加すると、表面含浸材の使用量の増加とともに得られる改質効果は大きくなり、使用量の増加に対する費用対効果が大きくなる傾向が得られた。

キーワード：けい酸塩系表面含浸材、ビッカース硬さ、水セメント比、使用量、費用対効果

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理の重要性の高まりを受けて、維持管理や予防保全手段の一つとしてけい酸塩系表面含浸工法が実施されている。けい酸塩系表面含浸材はコンクリート表面に含浸することで、主成分がコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および水と反応し、C-S-H ゲルを生成する。この C-S-H ゲルが、コンクリート中の微細空隙を充填し、コンクリートの表層部を緻密化することでコンクリート表面からの劣化因子侵入を阻止する。

けい酸塩系表面含浸工による改質効果を検討する方法については、現在においても確立されたものはない。しかし近年、筆者らは C-S-H ゲルの生成による強度増加特性を利用し、ビッカース硬さ試験を用いたけい酸塩系表面含浸工の改質効果に関する定量評価法について検討を行っている¹⁾²⁾。この方法を用いて、ビッカース硬さ試験によって得られたビッカース硬さ増加量と改質深さで囲まれた面積を測定し、この面積が劣化因子侵入阻止性を示す可能性を得た。また、等価かぶりの概念を利用し³⁾、けい酸塩系表面含浸工による改質部の見かけの拡散係数とこの面積の関係について定量評価を行い、両者の相関性を得ている⁴⁾。そのため、ビッカース硬さ試験を用いることにより、けい酸塩系表面含浸工の改質効果について定量的に評価できる可能性が示された。

一方で、けい酸塩系表面含浸工による改質効果については、母材モルタルの水セメント比により変化する可能性が挙げられる。水セメント比が小さいと細孔量が少なくなるため、毛細管現象により表面含浸材がモルタル中に浸透している可能性が高い。一方で水セメント比が大きくなると濃度勾配によりモルタル中にけい酸塩系表面

含浸材が浸透する可能性が高い⁵⁾。この現象は、母材モルタルの水セメント比により、けい酸塩系表面含浸材の最適な使用量が変化することを意味する。使用量の変化は労務費や材料費などの施工費にも影響を与える。前述のように、けい酸塩系表面含浸材の改質効果に関する研究事例は多くないため、けい酸塩系表面含浸工の費用対効果に関する研究事例もほぼ確認できない。建設従事者の労働人口減少、そして公共事業費の低減の必要性が求められる中、費用対効果の最大化を目指すことは今後さらに必要となってくる。

そのため本研究では、水セメント比が異なるモルタルにけい酸塩系表面含浸材の使用量を変化させて施工し、ビッカース硬さ増加量と改質深さで囲まれた面積の異なる供試体を作製する。その後、各条件で施工したけい酸塩系表面含浸材の直接工事費を算定する。面積と直接工事費を比較することで、けい酸塩系表面含浸材の施工による費用対効果について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験要因

本研究の試験要因を表-1 に示す。本研究では、水セメント比の違いがけい酸塩系表面含浸工の費用対効果に与える影響を検討する。そのため、水セメント比を3種類、けい酸塩系表面含浸材の使用量を5種類設定し、試験要因とした。

2.2 供試体概要

母材モルタルには普通ポルトランドセメントを用い、供試体は $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱供試体とした。使用したモルタル供試体の配合を表-2 に示す。モルタル

*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 富士化学(株) テクニカルセンター営業開発部技術グループ

*4 (株)第一コンサルタンツ 設計部橋梁構造課

表-1 試験要因

要因	水準
W/C	40%
	55%
	70%
けい酸塩系表面含浸材 使用量	0.1L/m ²
	0.2L/m ²
	0.4L/m ²
	0.6L/m ²
	0.8L/m ²

表-2 配合表

W/C	空気量	単体量(kg/m ³)		
		W	C	S
40%	4.5% ±	205	508	1523
55%		260	471	1408
70%	1.5%	308	439	1311

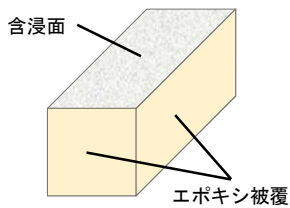


図-1 含浸面およびエポキシ被覆面

を打込み後1日で脱型し、材齢7日まで20℃の室内で湿潤養生を行った。その後、20℃、60%R.H.の恒温恒湿条件下で材齢28日まで存置した。材齢28日で、図-1に示すように、打込み面を含む5面をエポキシ樹脂で被覆し、残り1面に対して表面含浸材の使用量を変化させて施工した。

使用した表面含浸材の詳細を表-3に示す。表面含浸材の使用量が0.2L/m²以上のケースについては、塗り重ね間隔を1時間程度として0.2L/m²から0.8L/m²の施工を行った。施工時には、高周波容量式コンクリート・モルタル水分計を使用しながら、モルタル表面の含水率を7%程度に保つように散水処理を行った。そして表面含浸材施工後1日は湿潤養生を行い、20℃の一定環境下に27日間存置した。

2.3 試験方法および評価方法

所定の期間養生を行った供試体は、図-2に示すようにテーブルカッターを用いて、厚さ20mm程度に切断した。

けい酸塩系表面含浸材による改質効果の測定は、ビッカース硬さ試験をJIS Z 2244に準拠して行った。その際

表-3 表面含浸材の種類

種類	使用量	乾燥固形分率
けい酸ナトリウム系	0.1L/m ²	21.80%
	0.2L/m ²	
	0.4L/m ²	
	0.6L/m ²	
	0.8L/m ²	

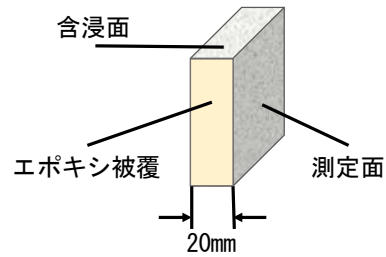


図-2 供試体切断状況

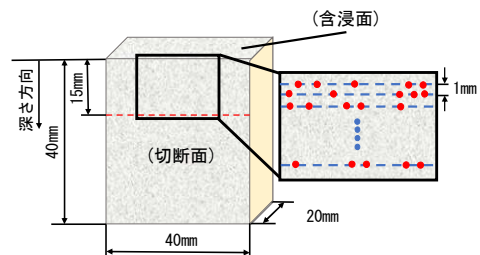


図-3 ビッカース硬さ試験の実施状況

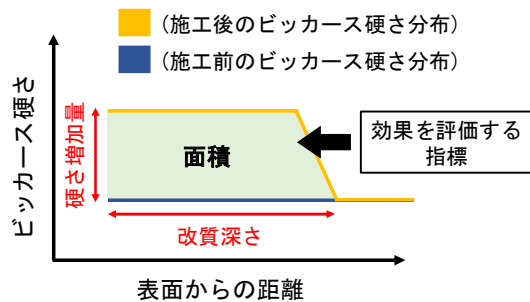


図-4 改質効果の評価方法

に、切断の影響で供試体側面にひび割れがないことを目視で確認して実施した。試験力は9.8N、試験力の保持時間は10秒とし、表面から深さ最大15mmまで1mm間隔で実施した。このとき、図-3に示すように、1測定深さあたり、±1Hvに5点収まる値を採用し、その平均値で評価を行った。また、ビッカース硬さ試験機に備え付けの光学顕微鏡を用いて、明らかに骨材とわかる箇所を避けながら打撃箇所を選定を行った。

けい酸塩系表面含浸材による改質効果の評価方法に

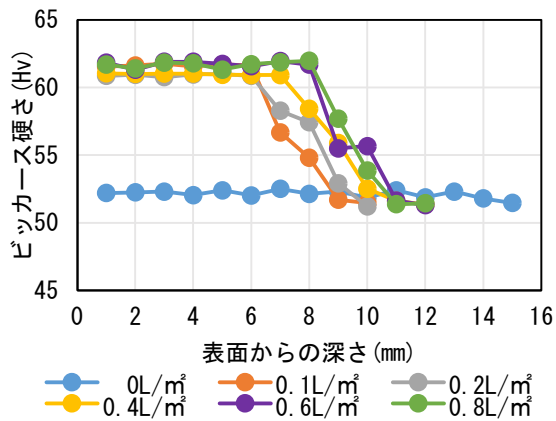


図-5 ビッカース硬さ分布 (W/C=40%)

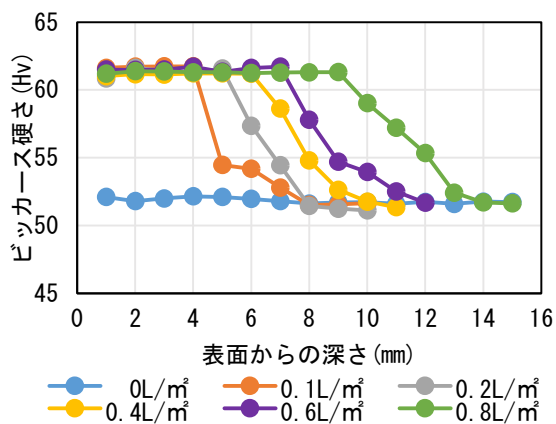


図-6 ビッカース硬さ分布 (W/C=55%)

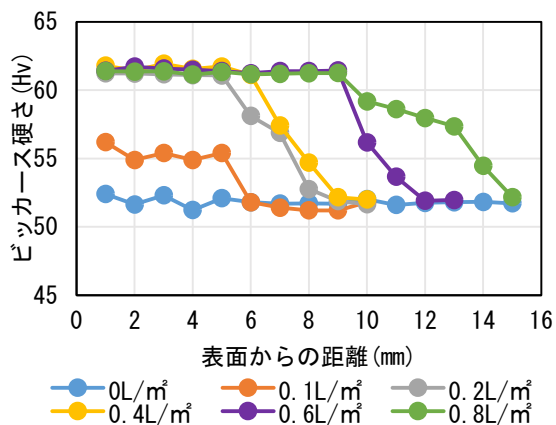


図-7 ビッカース硬さ分布 (W/C=70%)

について、近藤らはビッカース硬さの増加量と改質深さによって囲まれた面積と Cl⁻ 浸透阻止性の関係について定量的に評価を行っている。この面積が劣化因子の侵入阻止効果を示す指標となることを示している⁹⁾。そのため本研究では、図-4 に示すビッカース硬さ試験から得られるビッカース硬さの増加量、改質深さ、そして硬さ増加量と改質深さによって囲まれた面積の大きさを評価し

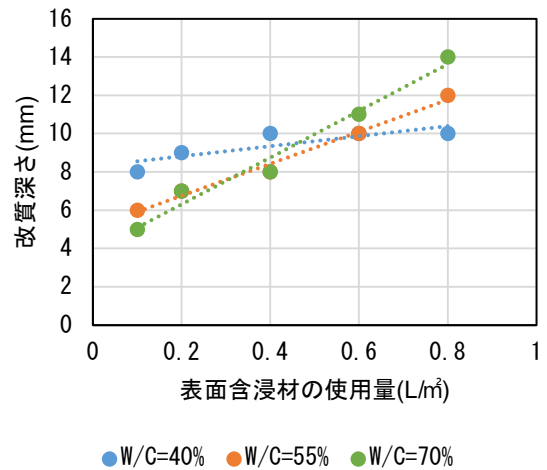


図-8 表面含浸材使用量と改質深さの関係

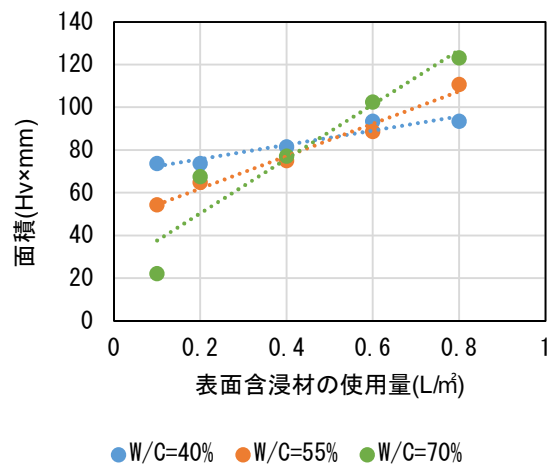


図-9 表面含浸材使用量と面積の関係

た。なお改質深さは、図-4 に示すように、ビッカース硬さが無塗布供試体と同じ硬さになるモルタル表面からの距離とした。

3. 試験結果

3.1 ビッカース硬さ試験結果

ビッカース硬さ試験による硬さ分布について、W/C=40%を図-5、W/C=55%を図-6、そして W/C=70%を図-7 に示す。

図-5 から図-7 より、いずれの水セメント比においても、けい酸塩系表面含浸材の使用量が増加するとともに改質深さも増加していることがわかる。ただし、けい酸塩系表面含浸材の改質効果によりビッカース硬さが増加した部分から、けい酸塩系表面含浸材を施工していない供試体のビッカース硬さまで、ビッカース硬さの低下状況については、水セメント比によりその様子が異なる。W/C=40%では、けい酸塩系表面含浸材の使用量が

表-4 けい酸塩系表面含浸材の施工費用(単位：円)

使用量	材料費	労務費+ 機械損料費	直接工事費
0.1L/m ²	660	2,388	3,048
0.2L/m ²	1,320	2,388	3,708
0.4L/m ²	2,640	4,776	7,416
0.6L/m ²	3,960	7,163	11,123
0.8L/m ²	5,280	7,163	12,443

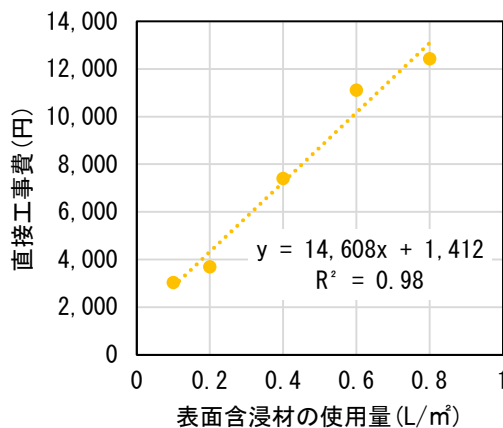


図-10 表面含浸材使用量と直接工事費の関係

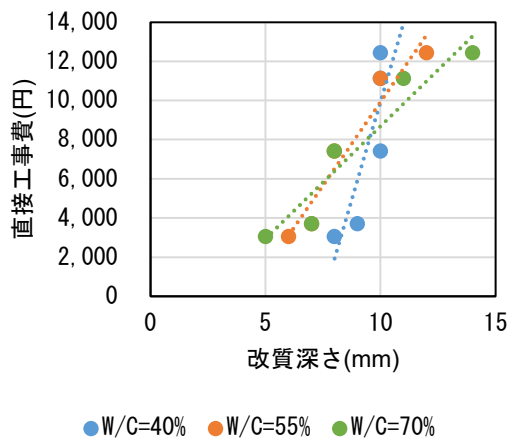


図-11 改質深さと直接工事費の関係

表-5 改質深さと直接工事費の相関関係

水セメント比(%)	式	R ²
40	y=4,012x-30,168	0.72
55	y=1,706x-7,122	0.94
70	y=1,149x-2,792	0.92

0.1L/m²と0.8L/m²までの範囲は非常に小さい。水セメント比の増加とともにその範囲が拡大する傾向が確認できる。

各水セメント比における表面含浸材施工量と改質深さの関係を図-8に示す。図中点線は、線形回帰直線である。けい酸塩系表面含浸材の施工量が増加すると、水セメント比の増加とともに、改質深さが増加する傾向が示された。これは既往の研究に示されるように、モルタル中の細孔量により、浸透プロセスが変化するために生じる現象であると考えられる⁷⁾。

けい酸塩系表面含浸材の使用量と、図-4のプロセスを経て算定した面積の関係を図-9に示す。図中点線は、線形回帰直線である。これらの関係は、図-8に示す改質深さと表面含浸材使用量の関係とほぼ同様の傾向を示した。これは、水セメント比の変化が、けい酸塩系表面含浸工の施工により増加するビッカース硬さ増加量に与える影響が小さいためと考えられる。今回の試験において、ビッカース硬さ増加量が明らかに小さいのは、W/C=70%における表面含浸材使用量0.1L/m²供試体のみであり、他の供試体においてビッカース硬さ増加量はほぼ同一である。これは、けい酸塩系表面含浸材の反応は、モルタル中のCa(OH)₂と表面含浸材中のけい酸塩により行われるためであること、そして他の水セメント比と比較し、けい酸塩系表面含浸材がモルタル中に浸透しようとするため、表層部での反応が小さくなったことが原因として考えられる。これまでに実施した筆者らの一連の研究において、水セメント比やけい酸塩系表面含浸材の使用量に関わらず、ビッカース硬さ増加量は大きな変化を示さない傾向が強いため⁸⁾、今回の結果はほぼ妥当なものであると考えられる。

3.2 けい酸塩系表面含浸工の直接工事費

けい酸塩系表面含浸工の費用対効果を検討するため、費用の算定を行う。費用については直接工事費を算定することにより検討を行う。

ここでは1m²あたりの直接工事費を算定した。想定工種は簡易清掃または下地処理、および含浸材塗布とした。材料費については、連名者の見積もりを参考に算定した。労務費および機械損料費については、土木コスト情報⁹⁾を参考とした。歩掛には1日あたりの施工時間の制限が考慮され、かつ日々の作業に伴う準備や片付け時間が考慮されていることから、土木コスト情報に従い、表面含浸材の使用量が0.10kg/m²から0.35kg/m²での労務費および機械損料費は同一とした。表面含浸材の使用量が0.25kg/m²増加するごとに、これらが増加する形で計算を行った。

これら条件に基づいて算定した直接工事費を表-4に示す。また、両者の関係を図に示したものを図-10に示

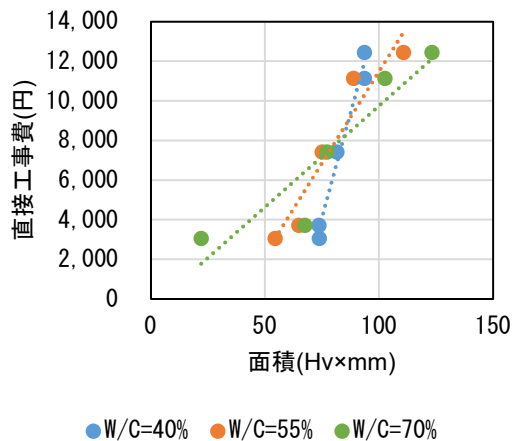


図-12 面積と直接工事費の関係

表-6 面積と直接工事費の相関関係

水セメント比 (%)	式	R ²
40	$y=420.52x-27,424$	0.98
55	$y=184x-5,214$	0.91
70	$y=108x-43$	0.87

す。労務費と機械損料費の合計値については、歩掛上同一となる使用量も存在するが、概ね表面含浸材の使用量と比例する形となる。

3.3 費用対効果の検証

3.1 で検討を行った、ビッカース硬さ試験から得られた改質深さ、およびビッカース硬さ増加量と改質深さで囲まれた面積、そして3.2で検討を行った直接工事費を利用し、けい酸塩系表面含浸工による費用対効果を検証する。

ビッカース硬さ試験により得られた改質深さと直接工事費の関係を図-11に示す。図中点線は、線形回帰直線を示す。W/C=40%では、表面含浸材の使用量により改質深さが大きく変化しないが、直接工事費が増加している状況を示している。水セメント比の増加とともに改質深さと直接工事費の傾きが小さくなる状況を示した。この2つについて線形回帰した回帰直線式および相関係数を表-5に示す。この結果より、W/C=40%と70%において、線形回帰式の傾きが4倍程度異なる。これは上述のように、モルタル中へのけい酸塩系表面含浸材の浸透メカニズムが大きく影響していると考えられる。毛細管現象による浸透が支配的である低水セメント比モルタルでは、けい酸塩系表面含浸材の使用量の増加により、改質深さが大きく変化しない。しかしけい酸塩系表面含浸材の使用量の増加とともに、費用は直線的に増加するため、直接工事費の増加割合に差が生じたものと考えられる。

ビッカース硬さ試験により得られた面積と直接工事費の関係を図-12に示す。W/C=40%では改質深さ同様、面積の増加と比較して、直接工事費の増加量が大きい傾向が確認できる。水セメント比の増加とともに、面積と直接工事費の傾きが小さくなる傾向を示した。この2つについて線形回帰した回帰直線式および寄与率を表-6に示す。

この結果より、W/C=40%と70%において、線形回帰式の傾きが4倍程度異なる。これは、けい酸塩系表面含浸材の使用量の変化は、改質効果を示すビッカース硬さ増加量に大きな影響を与えず、主として改質深さに影響を与えるため、改質深さの場合と同様の傾向を示したものと考えられる。ただし、両者の回帰式の寄与率については、水セメント比の増加とともに小さくなる傾向を示した。これは、W/C=70%ではけい酸塩系表面含浸材の使用量が少ない場合、ビッカース硬さ増加量が他の水セメント比および使用量と比較して、増加しにくいことが影響していると考えられる。そのため、W/C=70%では寄与率が低下しているものと考えられる。しかし、寄与率が0.87であるため、面積と直接工事費の関係には高い相関があると考えられる。

4. 考察および今後の課題

本論文では、けい酸塩系表面含浸材の使用量と母材モルタルの水セメント比を試験要因にした場合における、けい酸塩系表面含浸材による改質効果について、費用対効果の概念を用いて評価を行った。改質効果については、改質深さおよびビッカース硬さ増加量および改質深さで囲まれた面積を用いた。

その結果、改質深さおよび面積ともに水セメント比が小さいと、直接工事費が増加してもその効果は小さい傾向が得られた。水セメント比の増加とともに、改質効果と直接工事費の回帰直線の傾きが小さくなり、すなわち直接工事費の増加とともに改質効果が得られる傾向が示された。これは、けい酸塩系表面含浸工による改質効果は、細孔構造など母材モルタルの性質に左右されることが考えられる。現在、母材モルタルの水セメント比とけい酸塩系表面含浸工の使用量の関係について、改質効果や費用対効果に関する明確な知見は示されていない。そのため、特に費用面で効果が高い工法が求められるコンクリート構造物の維持管理においては、大きな設計資料になることが想定される。

一方で、今回の費用対効果の試算例は、限られた条件の下で実施している。けい酸塩系表面含浸材は、モルタル中のCa(OH)₂との反応により得られるものである。けい酸塩系表面含浸材の主成分の違い、[Na₂O]/[SiO₂] (モル比)の違い¹⁰⁾、既に中性化が生じているコンクリート構

造物への施工¹¹⁾、そして高炉スラグ微粉末を混入したコンクリート構造物への施工¹²⁾など、検証すべき項目は多い。そのため、けい酸塩系表面含浸工の費用対効果については、今回検証を行った面積の精査を含め、引き続き検討を行っていく必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、異なる水セメント比のモルタル供試体にけい酸塩系表面含浸材の使用量を変化させて施工し、ビッカース硬さ試験により改質効果について検討を行った。ビッカース硬さ増加量と改質深さで囲まれる面積、そして改質深さを定量的に評価した。その後、それらとけい酸塩系表面含浸材の使用量ごとの直接工事費と比較することで、けい酸塩系表面含浸材の施工における費用対効果について検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) けい酸塩系表面含浸材の施工により得られるビッカース硬さ増加量と改質深さで囲まれた面積は、いずれの水セメント比においても表面含浸材の使用量の増加に伴って大きくなる傾向を示した。ただし、面積の増加傾向は水セメント比により異なり、W/C=40%と比較し、W/C=70%では約4倍の増加割合を示した。
- (2) 改質深さについても、表面含浸材の使用量の増加とともに大きくなる傾向を示した。ただし、改質深さの増加傾向は水セメント比により異なり、W/C=40%と比較し、W/C=70%では約4倍の増加割合を示した。
- (3) けい酸塩系表面含浸材の施工による費用対効果について、水セメント比が小さい場合は、直接工事費の増加により得られる効果にほとんど変化は見られなかった。一方で、水セメント比の増加とともに、直接工事費が増加した際に得られる効果は大きくなり、費用対効果が良化する可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 宮島英樹, 近藤拓也, 佃洋一, 宮里心一: 13年暴露したけい酸塩系表面含浸材の性能に関する一考察, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.15, pp.7-12, 2015.10
- 2) 近藤拓也, 樋口和朗, 宮里心一, 横井克則: けい酸塩系表面含浸材のCl⁻侵入阻止を示す指標に関する

実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1645-1650, 2017.7

- 3) 黒岩大地, 宮里心一: けい酸塩系表面含浸材の改質部における見かけの拡散係数の推定方法の提案と発錆遅延期間の試算, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.71, No.2, pp.124-134, 2015.
- 4) 近藤拓也, 樋口和朗, 宮里心一, 横井克則, 山田悠二: けい酸塩系表面含浸工法の塩分浸透阻止指標に関する定量的評価, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.137-142, 2017.10
- 5) 染谷望, 加藤佳孝: けい酸塩系表面含浸材の浸透機構および改質効果に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.181-189, 2014
- 6) 近藤拓也, 宮里心一, 高橋由菜, 横井克則: けい酸塩系表面含浸工の改質効果とCl⁻浸透阻止性に関する定量評価方法の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.74, pp.310-317, 2020.3
- 7) 近藤拓也, 黒岩大地, 宮里心一, 島村佳汰, 高橋由菜: ビッカース硬さを指標としたけい酸塩系表面含浸材の改質効果に関する定量的評価, 材料, Vol.72, No.7, pp.507-513, 2023.7
- 8) 近藤拓也, 宮里心一, 西野英哉, 横井克則: けい酸塩系表面含浸工を施工したモルタルのビッカース硬度分布に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, pp.333-339, 2020.3
- 9) 建設物価調査会: 季刊土木コスト情報 2023年10月秋号, 2023.10
- 10) 大嶋俊一, 黒岩大地, 西野英哉, 宮里心一: けい酸塩系表面含浸材におけるけい酸ナトリウムのモル比とモルタル改質効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019
- 11) 島村佳汰, 近藤拓也, 黒岩大地, 横井克則: 中性化したモルタルへのけい酸塩系表面含浸工による改質効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1462-1467, 2022.7
- 12) 二神啓, 近藤拓也, 黒岩大地, 長谷川雄基, 横井克則: けい酸塩系表面含浸材を施工した高炉スラグ微粉末混入モルタルの物性, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.21, pp.313-318, 2021.10